

УДК 553.493(470.22)

ЛЮДМИЛА ВЛАДИМИРОВНА КУЛЕШЕВИЧ

кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и геофизики горно-геологического факультета, Петрозаводский государственный университет, ведущий научный сотрудник, Институт геологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)

*kuleshev@krc.karelia.ru***АНТОНИНА ВАСИЛЬЕВНА ДМИТРИЕВА**

аспирант, Институт геологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)

*DmitrievaA-V@yandex.ru***РУФ АНДРЕЕВИЧ ХАЗОВ**

кандидат геолого-минералогических наук, консультант, Институт геологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)

BA-SR-P-Ti-TR-ПОЛЕВОШПАТОВОЕ СЫРЬЕ ЭЛИСЕНВААРСКОГО ЩЕЛОЧНОГО КОМПЛЕКСА (КАРЕЛИЯ): ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Приводятся данные по экономической оценке комплексного Ba-Sr-P-Ti-TR-полевошпатового сырья Элисенваарского дифференцированного щелочного комплекса в северо-западном Приладожье (Карелия), содержанию и распределению в породах редкоземельных элементов (REE) и их минеральным ассоциациям. Они представлены монацитом, ортитом, TR-эпидотом, TR-апатитом и титанитом, бастнезитом, паризитом, лантанитом, Ca-Sr-Ce-карбонатом. В незначительном количестве REE встречаются в цирконе и прочих силикатах.

Ключевые слова: редкоземельные элементы и REE-минералы (монацит, ортит, бастнезит), TR-содержащие минералы (апатит, титанит), щелочной комплекс, Элисенваара, Карелия

ЭЛИСЕНВААРСКИЙ ЩЕЛОЧНОЙ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ПРИЛАДОЖЬЯ

Элисенваарский щелочной дифференцированный комплекс северо-западного Приладожья с возрастом ~1,775 млрд лет [2] включает интрузивные тела Кайвомяки, Райвимики и более мелкие интрузии (около 12), образующие массивы сложного строения на площади ~100 км². Интрузии имеют штокообразную, овальную форму и дифференцированное кольцевое строение [3]. Комплекс объединяет гипабиссальные, диатремовые и дайковые тела, сформировавшиеся в результате двух фаз магматизма – интрузивной ультрамафит-мафитовой и эксплозивной (или диатремовой) сиенитовой. Щелочные породы дифференцированы от ультраосновных до основных и средних. В диатремовых фациях присутствуют многочисленные обломки глубинных пород более ранних фаз, ксенолиты, мегакристаллы и нодулы клинопироксена, флогопита-биотита и апатита размером 1–10 см. Породы недосыщены кремнеземом, имеют высокое содержание K₂O (Na₂O/K₂O = 0,34–0,84), P₂O₅ (0,43–0,5 %), SrO (0,45–2,2 %), BaO (0,23–2 %), F (0,12–1,5 %) [3]. Типоморфными минералами этих щелочных пород являются калиевые полевые шпаты с микропертитам (от 20–45 до

80 %), содержащие Sr, Ba, Na, клинопироксен, амфибол, биотит-флогопит, титанит, апатит, REE-минералы. В связи с этим сами породы рассматриваются как источник полевошпатового сырья с P, Ti, REE.

Р. А. Хазовым для массивов Райвимики и Кайвомяки были рассчитаны прогнозные ресурсы комплексного оруденения (пород с полезными компонентами), а в нем апатитового, редкоземельно-титанитового и Sr-Ba-полевошпатового сырья (см. таблицу). Содержание P₂O₅ колеблется и составляет 0,43–10,5 % (среднее 2,5–5 %), SrO 0,45–2,2 %, BaO 0,23–2,0 %, F 0,12–1,5 %, средняя сумма REE – 0,2–0,5 %, в концентратах и монофракциях апатита и титанита установлены наиболее высокие содержания Ce, La, Nd, Y. Прогнозные ресурсы комплексного сырья (см. таблицу) оцениваются в 6–7,5 млрд т руды: P₂O₅ 200–250 млн т (при среднем содержании P₂O₅ 3,5 %), титанита 240–300 млн т (при среднем содержании титанита в породе 4 %), Sr-Ba-полевошпатового сырья 2 млрд т (в тенсбергитах – до 12 млрд т). Ресурсы REE оцениваются в 15 млн т (при среднем содержании суммы REE 0,25 %).

ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА РАБОТЫ

REE в последние годы нашли широкое применение в различных отраслях промышленно-

Прогнозные ресурсы и содержание полезных компонентов в породах, рудах и обогащенных концентратах [3]

Сырье	Ресурсы P ₃ (млрд т)	P ₂ O ₅ % P ₃ (млн т)	REE % (млн т)	SrO % (млн т)	BaO % (млн т)	Fsp % (млн т)	TiO ₂ % (млн т)
Комплексное сырье (ладогиты)	6–7,5	3,5 (200–250)	0,25 (15)	1,0 (60)	1 (60)	30–35 (2000)	1,5 (90)
Апатитовый концентрат	0,5–0,6	38–40 (200)	1 (5)	1,5 (7,5)			
Кпш-концентрат	2,0			1–3 (50)	2–6 (50)	99 (2000)	
Концентрат REE-титанита	0,15–0,2 (до 0,3)		1,5 (2,2–3)				36 (50–70)

сти и новых технологиях. Наиболее крупные их месторождения локализуются преимущественно на древних кристаллических щитах в щелочных массивах, поэтому изучение щелочных пород и метасоматитов имеет важное значение [1]. В задачи настоящей работы входило установление минералов-концентраторов и распределение редкоземельных элементов в породах и рудах массивов Райвимаки и Кайвомаки Элисенваарского комплекса.

Изучение рудной (REE-содержащей апатитовой и титанитовой) минерализации и щелочных пород проводилось с использованием методов химического и RFA. Содержание REE в породах, концентратах и рудах проводилось ранее в лаборатории ЦНИГРИ (г. Москва). Современное изучение REE осуществлялось с использованием ICP-MS-анализа, парагенезисов и минералов REE в аншлифах на электронном сканирующем микроскопе VEGA II LSH с микроанализатором INCA Energy-350 в Институте геологии КарНЦ РАН (г. Петрозаводск).

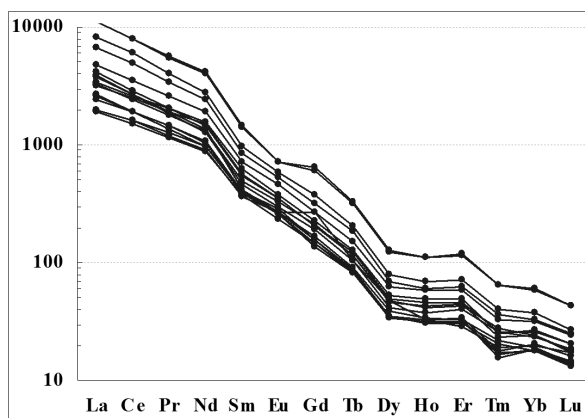
Распределение редкоземельных элементов. По данным современных прецизионных ICP-MS-исследований установлено, что породы и руды (REE-apatит-титанитовые) глубинной и диатремовой фаций имеют подобные спектры распределения REE и содержат преимущественно элементы La-Ce-группы (в сумме 0,15–1,1 %, в

среднем ~3916 ppm, рис. 1а). Меланократовые породы (невоиты, мелано- и мезократовые ладогиты) глубинных фаций и ксенолиты более обогащены REE относительно лейкократовых, а также диатремовых фаций. В более лейкократовых породах с микроклином и сиенитах наблюдается Eu минимум (рис. 1б).

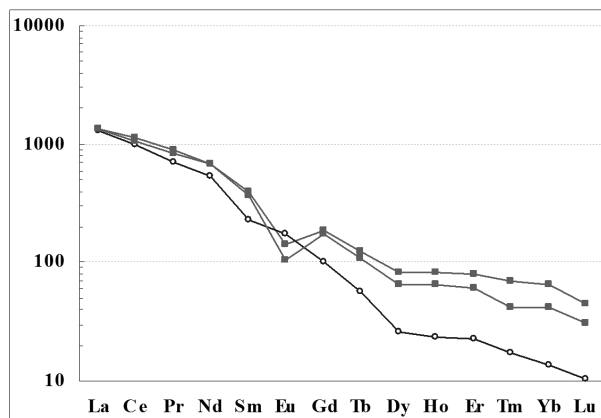
Суммарное содержание REE в апатитовых концентратах из мегакритов и нодулей, по Р. А. Хазову, может достигать 1,3 % (среднее 0,7 %), в титанитовых – 0,8–1,07 %.

Минералы-концентраторы REE. В щелочных породах массива (ладогитах) установлены собственные REE-минералы – фосфаты, силикаты, карбонаты (рис. 2), а также TR-содержащие апатит, титанит и эпидот.

Монацит обычно образует отдельные, более крупные зерна, их скопления, а в апатите – микровключения (размером от 60–200 мкм до 3–5 мкм). Он цементируется ортитом. *Ортит* (алланит) обычно образует цепочки зерен (размером от 1 до 80 мкм) и каймы вокруг нодулей апатита и кристаллов титанита, выделяется в них в микротрещинках (рис. 2б). Реже встречаются более крупные хорошо ограненные кристаллы и зональные алланиты-TR-эпидоты (рис. 2в). Крупный апатит ксенолитов и нодулей обычно бывает «насыщен» и окаймлен REE-минералами (10–15 % от массы гнезд апатита). На стадии



а



б

Рис. 1. Распределение редкоземельных элементов в породах Элисенваарского комплекса (нормирование по хондриту C1): а – невоиты, меланолдогиты (в том числе с апатитом и титанитом); б – сиениты и лейкократовые микроклин-биотит-амфиболовые ладогиты

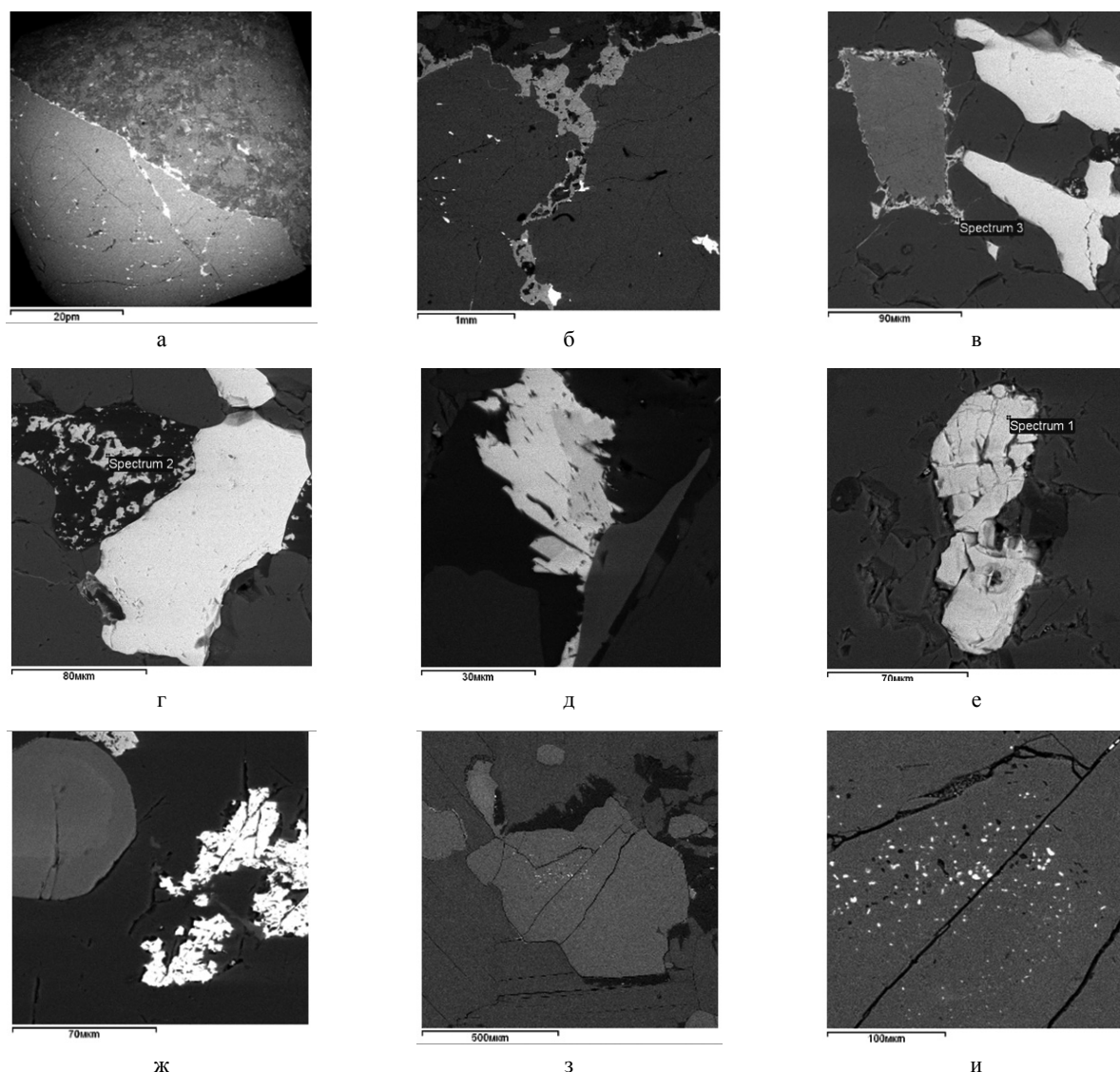


Рис. 2. Минеральные ассоциации щелочных пород Элисенваарского комплекса: а) Нодули апатита (светло-серый) с включениями TR-минералов; б) Апатит (темно-серый), ортит (серый), монацит (белый); в) Монацит (белый) в апатите, TR-эпидот (серый) с каймой бастнезита (sp. 3); г) Монацит (белый), Sr-барит (sp. 2), апатит (темно-серый); д) Sr-Ce-La-карбонат (белый, зональный); е) Zr-La-Ce-титанит (sp. 1); ж) Зональный Ce-apatит (серый) и Sr-барит (белый); з) Целестин (белые точки) в апатите (серый); и) Целестин (белые точки) в апатите

более позднего низкотемпературного преобразования пород, сопровождающегося образованием хлорита, кальцита, иногда сульфидов, образуются редкие минералы – *лантанит*, *бастнезит* и *паризит*, а также более редкие *Ca-Sr-Ce-карбонаты*, они встречаются с хлоритом, сульфидами, Sr-баритом, целестином (рис. 2г, д). Бастнезит иногда замещает ортит и TR-эпидоты.

Апатиты всех выделяемых генераций относятся к фтористым (незначительно содержат Cl 0,2–0,4 %). Содержание апатита составляет 5–15 % в породах и до 90 % в крупных кристаллах, нодулярных стяжениях и гнездах – природных концентратах (рис. 2а, б). Он содержит тонкодисперсные включения монацита, целестина-стронциобарита и сам является концентратом REE. Кристаллы апатита зонального

строения с изоморфными включениями REE имеют центральные более высокоцериевые ядра (Ce ~1,3–1,5 %) и более светло-серую окраску (рис. 2ж). Содержание Sr, изоморфно входящего в апатит, составляет около 1,2–1,6 %. Апатит с микро- и нановключениями – вростками Sr-минералов (рис. 2з, и) содержит гораздо более высокую концентрацию Sr. Следует отметить, что Sr входит также в Ba-содержащие полевые шпаты, незначительно в минералы группы эпидота и образует собственные более низкотемпературные минералы – *целестин*, *стронциобарит* (4–6 % Sr), *целестобарит* и *Ca-Sr-Ce-карбонат* (*анцилит*).

В ультраосновных и основных разностях пород (невоитах и ладогитах, используются местные названия, по Р. А. Хазову) обычны сроста-

ния титанита, ильменита и апатита. *Титанит* преобладает в основных разновидностях пород (в ладогитах ~4–5 %). Он выделяется самостоятельно, в сростках с апатитом (в рудах и гнездах), ильменитом и реже магнетитом. Титанит, как и апатит, бывает окаймлен ортитом. Установлены цериевые, а также иногда Th и Zr-содержащие титаниты (цирконолит, рис. 2е). В более крупных кристаллах титанита наблюдается зональность: в центральных частях зерен содержание REE увеличивается до 2,83 %. *Циркон* и реже *бадделлит* встречаются в небольших и акцессорных количествах почти во всех типах пород, но чаще в лейкократовых с пертитовыми Ba-Sr-полевыми шпатами. Циркон содержит примеси Ca, Hf, реже TR (до 4,6 % Ce). Бадделлит иногда образует игольчатые кристаллы в сростании с ортитом.

ВЫВОДЫ

Благодаря микрозондовым исследованиям установлен широкий спектр минералов, содержащих редкоземельные элементы, и изоморфные замещения в апатите и титаните. Среднее

содержание редкоземельных элементов в ладогитах составляет 0,39 %, более высокие концентрации (1–1,3 %) характерны для меланократовых пород и глубинных ксенолитов, содержащих апатит и титанит. REE-минералы тяготеют преимущественно к рудным скоплениям апатита и титанита, поэтому концентраты этих минералов вполне оправданно могут рассматриваться как основное сырье на редкоземельные элементы (табл. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С учетом комплексного характера полезных компонентов и большого объема пород Элисенваарский комплекс еще с 90-х годов прошлого столетия был выделен для освоения как перспективный на Ba-Sr-полевошпатовое сырье с Ti, P и TR [3]. Благодаря развитию новых технологий переработки и возросшим потребностям в редкоземельных элементах крупные щелочные ультраосновные массивы Райвимаки и Кайвомаки Элисенваарского комплекса становятся еще более инвестиционно привлекательными для комплексного освоения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулешевич Л. В., Дмитриева А. В. Минералы и источники редкоземельных элементов в Карелии // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2012. № 4 (125). С. 62–66.
2. Ранний докембрий Балтийского щита / Под ред. чл.-кор. РАН В. А. Глебовицкого. СПб.: Наука, 2005. 711 с.
3. Хазов Р. А., Попов М. Г., Бискэ Н. С. Рифейский калиевый щелочной магматизм южной части Балтийского щита. СПб.: Наука, 1993. 217 с.

Kuleshevich L. V., Petrozavodsk State University,

Institute of Geology Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

Dmitrieva A. V., Institute of Geology Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

Khazov R. A., Institute of Geology Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

BA-SR-P-TI-TR-FELDSPAR RAW MATERIALS OF ELESENVAARA ALKALINE COMPLEX, KARELIA: GEOCHEMISTRY AND MINERALOGY OF RARE-EARTH ELEMENTS

The data obtained by the economic evaluation of the complex Ba-Sr-P-Ti-TR-feldspar raw materials of Elisenvaara differentiated alkaline complex, located in the northwestern area of Lake Ladoga, Karelia, the concentrations and distribution of REE in the rocks and their mineral assemblages are reported. They are represented by monazite, orthite, TR-epidote, TR-apatite and titanite, bastnaesite, parisite, lanthanite, and Ca-Sr-Ce-carbonate. REE occur in small quantities in zircon and other silicates.

Key words: rare-earth elements and REE-minerals (monazite, orthite, bastnaesite), TR-bearing minerals (apatite, titanite), alkaline complex, Elisenvaara, Karelia

REFERENCES

1. Kuleshevich L. V., Dmitrieva A. V. Minerals and sources of rare-earth elements in Karelia [Mineraly i istochniki redcozemel'nykh elementov v Karelii]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences]. 2012. № 4 (125). P. 62–66.
2. *Ranniy dokembriy Baltiyskogo shchita* [The Early Precambrian of the Baltic Shield] / Pod. red. chl.-kor. RAN V. A. Glebovitskogo. St. Petersburg, Nauka Publ., 2005. 711 p.
3. Khazov R. A., Popov M. G., Biske N. S. *Rifeyskiy kalievyy shchelochnoy magmatizm yuzhnoy chasti Baltiyskogo shchita* [Riphean potassic alkaline magmatism of the southern Baltic Shield]. St. Petersburg, Nauka Publ., 1993. 217 p.

Поступила в редакцию 13.03.2014